



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 197 49 377 A 1

⑤ Int. Cl.⁶:
G 01 J 9/02
G 01 B 9/02

②① Aktenzeichen: 197 49 377.7
②② Anmeldetag: 7. 11. 97
④③ Offenlegungstag: 2. 6. 99

DE 197 49 377 A 1

⑦① Anmelder:
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE

⑦④ Vertreter:
v. Bezold & Sozien, 80333 München

⑦② Erfinder:
Hirschberg, Joseph G., Dr., Coral Gables, Fla., US

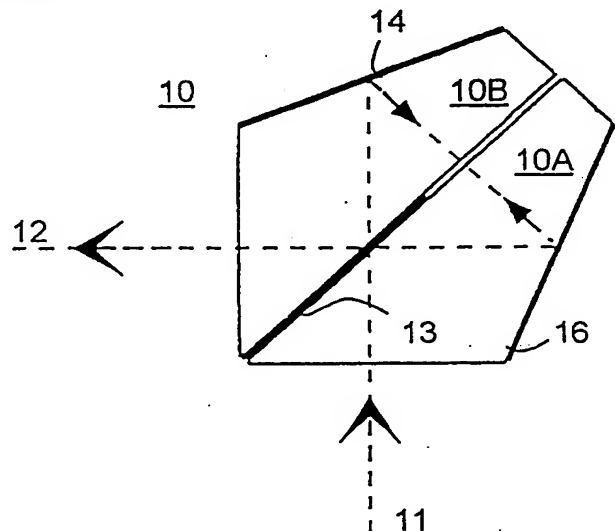
⑤⑥ Entgegenhaltungen:
DE 1 95 45 369 C1
DE 43 22 682 C2
US 54 93 394

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Vorrichtung und Verfahren für interferometrische Messungen

⑤⑦ Bei einer Interferometeranordnung mit mehreren Um-
lenkspiegeln und mindestens einem Strahlteiler, die so
angeordnet sind, daß ein eintretender Lichtstrahl (11) in
Teilstrahlen aufgespalten wird, die entlang vorbestimm-
ter Lichtwege laufen und sich zu einem austretenden
Lichtstrahl (12) überlagern, führen die Lichtwege durch ei-
nen für den eintretenden Lichtstrahl (11) durchlässigen In-
terferometerkörper (10), in dem sich der Strahlteiler (13)
befindet und auf dessen Oberfläche die Umlenkspiegel
(14, 16) angeordnet sind.



DE 197 49 377 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Interferometeranordnung, insbesondere eine Interferometeranordnung mit zueinander unbeweglich angeordneten optischen Elementen wie z. B. ein Sagnac-Interferometer, und interferometrische Untersuchungsverfahren unter Verwendung derartiger Interferometeranordnungen.

Herkömmliche Zweiweg-Interferometer (sogenannte Michelson-Interferometer) basieren auf der linearen Erzeugung einer optischen Wegdifferenz zwischen zwei Teilstrahlen eines hinsichtlich seiner spektralen Eigenschaften zu untersuchenden Lichtstrahls. Der zu untersuchende Lichtstrahl wird mit einem Strahlteiler auf zwei Interferometerspiegel gelenkt, die die jeweiligen Teilstrahlen in sich zurückreflektieren, wonach am Strahlteiler eine Überlagerung der rückreflektierten Teilstrahlen erfolgt. Die optische Wegdifferenz wird durch Verstellung des Abstandes eines der Interferometerspiegel vom Strahlteiler erzeugt. Die Überlagerung der reflektierten Teilstrahlen resultiert in einem charakteristischen Interferenzmuster, das mit einer Detektoreinrichtung erfaßt wird und mittels Fourier-Transformation eine Analyse der spektralen Eigenschaften des eintretenden Lichtstrahles erlaubt.

Michelson-Interferometer besitzen für Spektraluntersuchungen den Vorteil, daß im Unterschied zu Dispersionsanordnungen mit einer Messung unmittelbar ein ganzer Spektralbereich erfaßbar ist. Außerdem ist die Lichtausbeute hoch, so daß sich gegenüber den Dispersionsanordnungen ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis ergibt. Ein wesentlicher Nachteil von Michelson-Interferometern besteht jedoch darin, daß das Interferenzmuster nur dann ausgewertet werden kann, falls die gegenseitige Anordnung der Interferometerbestandteile (Strahlteiler, Spiegel usw.) höchsten Stabilitätsanforderungen genügt. Die optischen Elemente eines Michelson-Interferometers müssen daher laufend von störenden Schwingungen, Luftströmungen und Temperaturänderungen abgeschirmt werden, so daß der Einsatz derartiger Interferometer auf Spezialanwendungen insbesondere im Laborbereich beschränkt ist.

Ein stabilisiertes Michelson-Interferometer wird von J. G. Hirschberg et al. in "Applied Optics" (Band 18, 1979, Seite 2726-2727) beschrieben. Bei diesem Interferometer sind die Interferometerspiegel fest an den Innenwänden eines Gehäuses angebracht. Die optische Wegdifferenz wird durch Bewegung des Strahlteilers und eines Zusatzspiegels erzeugt, die über flexible Membranen mit der Gehäusewand verbunden und durch Anlegen eines Gasdruckes verschiebbar sind. Dieser Aufbau ist jedoch aufwendig und anfällig gegenüber Störungen.

Die genannten Nachteile können teilweise mit einem Einweg-Interferometer (sogenanntes Sagnac-Interferometer) beseitigt werden, wie es allgemein beispielsweise von Y. Garini et al. in "Fluorescence Imaging Spectroscopy and Microscopy" (Herausgeber: X. F. Wang und B. Herman, John Wiley & Sons, 1996, Kapitel 4, Seite 120 ff.) beschrieben wird. Bei einem Sagnac-Interferometer sind ein Strahlteiler und zwei Interferometerspiegel so angeordnet, daß sich für beide Teilstrahlen ein gemeinsamer Lichtweg ausbildet, der jedoch von den Teilstrahlen jeweils mit entgegengesetzten Richtungen durchlaufen wird. Die Bildung eines gemeinsamen Lichtweges ist mit einer erhöhten Meßgenauigkeit verbunden, da sich Verschiebungen optischer Elemente auf beide Teilstrahlen in gleicher Weise auswirken, so daß dadurch kein Meßfehler entsteht.

Fig. 4 zeigt als Beispiel eines herkömmlichen Sagnac-Interferometers das von J. V. Swedler et al. in "Applied Spectroscopy" (Band 43, 1989, Seite 1378-1384) beschriebene

Interferometer 40. Der einfallende Lichtstrahl 41 trifft auf den Strahlteiler 43. Ein erster Teilstrahl tritt durch den Strahlteiler 43 hindurch und wird über den ersten Interferometerspiegel 44 und den zweiten Interferometerspiegel 46 5 erneut durch den Strahlteiler 43 zur Bildung des austretenden Lichtstrahls 42 gelenkt. Der zweite Teilstrahl wird über den gleichen, entgegengesetzten Lichtweg über den zweiten Interferometerspiegel 46 und den ersten Interferometerspiegel 44 zur Überlagerung mit dem ersten Teilstrahl im austretenden Lichtstrahl 42 gelenkt. Weitere optische Elemente 10 dienen der Abbildung des austretenden Lichtstrahl auf einer Detektoranordnung 48. Der erste Interferometerspiegel 44 ist zur Erzeugung der optischen Wegdifferenz verschiebbar angeordnet. Trotz der genannten erhöhten Meßgenauigkeit ist das Interferometer 14 nachteilig, da die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Einstellung des ersten Interferometerspiegels 44 beschränkt ist. Dieser Nachteil läßt sich beseitigen, wenn, wie in der oben genannten Publikation Y. Garini et al. vorgeschlagen, beide Interferometerspiegel fest positioniert und die optische Wegdifferenz durch Verschwenken des Sagnac-Interferometer gegenüber der Richtung des eintretenden Lichtstrahls erzielt wird. Allerdings verbleibt auch in diesem Fall der Nachteil, daß das Interferometer von jeglichen Luftturbulenzen abgeschirmt werden muß.

Weitere Nachteile herkömmlicher Sagnac-Interferometer betreffen deren Herstellbarkeit. Erstens ist es aufwendig, die optischen Elemente herkömmlicher Sagnac-Interferometer ortsgenau und stabil zu positionieren. Außerdem läßt sich die Anbringung des Strahlteilers und der Interferometerspiegel nicht miniaturisieren. Dies bedeutet insbesondere einen Nachteil für die Datenaufnahme. Soll beispielsweise die optische Wegdifferenz durch Interferometerschwenkung erzeugt werden, so ist die Schwenkgeschwindigkeit herkömmlicher Sagnac-Interferometer aufgrund ihrer Größe 35 beschränkt, was sich nachteilig auf die Geschwindigkeit der Datenakquisition auswirkt. Aufgrund dieser Nachteile ist auch der Einsatzbereich dieses Interferometertyps beschränkt.

Es ist die Aufgabe der Erfindung, eine verbesserte Interferometeranordnung anzugeben, die eine erhöhte Stabilität besitzt und einfacher herstellbar ist. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, ein interferometrisches Meßverfahren unter Verwendung einer derartigen Interferometeranordnung anzugeben.

Diese Aufgaben werden mit einer Anordnung bzw. einem Verfahren gemäß den Patentansprüchen 1 bzw. 9 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Die Erfindung basiert auf der Idee, eine Interferometeranordnung anzugeben, bei der die optischen Elemente zur Erzeugung und Umlenkung zueinander kohärenter Teilstrahlen in bzw. auf einem Körper aus einem Material angeordnet sind, das für das jeweils verwendete Licht durchlässig ist. Die Interferometeranordnung funktioniert entweder nach dem Einweg-Prinzip oder einem modifizierten Zweiweg-Prinzip. Der Interferometerkörper ist vorzugsweise ein Festkörper aus einem transparenten Material (z. B. Glas oder Kunststoff) und besteht aus zwei Teilprismen, die in Bezug auf eine gemeinsame Kontaktfläche symmetrisch angeordnet sind. Die Kontaktfläche ist mit einem Strahlteiler versehen, der zur Erzeugung der Teilstrahlen und deren Überlagerung nach Durchlaufen des Interferometerkörpers eingerichtet ist. Auf ebenen Oberflächen des Interferometerkörpers sind reflektierende Bereiche vorgesehen, die Umlenkspiegel zur Bildung des von den Teilstrahlen durchlaufenen Lichtweges darstellen.

Die erfindungsgemäße Interferometeranordnung ist für die Realisierung sämtlicher interferometrischer Meßprinzi-

pien geeignet, die mit herkömmlichen Interferometeranordnungen implementiert werden. Die Erzeugung der optischen Wegdifferenz wird durch eine Veränderung der gegenseitigen Ausrichtung zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und dem Interferometerkörper erzielt. Hierzu erfolgt vorzugsweise eine Schwenk- oder Rotationsbewegung des Interferometerkörpers. Ein erfindungsgemäßes interferometrisches Meßverfahren ist dementsprechend insbesondere dadurch gekennzeichnet, daß eine Interferometeranordnung gegenüber einem einfallenden Lichtstrahl gedreht wird. Die Drehung kann wegen der vorteilhaften Miniaturisierbarkeit des Interferometerkörpers mit hoher Geschwindigkeit erfolgen, wobei die Erfassung des austretenden Lichtstrahls mit den überlagerten Teilstrahlen mittels einer Detektoranordnung jeweils während eines geeigneten Teilausschnitts während der Drehbewegung erfolgt.

Die erfindungsgemäße Interferometeranordnung besitzt die folgenden Vorteile. Der Interferometerkörper ist einfach herstellbar, indem geeignet lichtdurchlässige Materialien mit herkömmlichen Bearbeitungsverfahren in die gewünschte Teilprismenform gebracht und auf die Oberflächen der Teilprismen der Strahlteiler bzw. die Umlenkspiegel aufgebracht werden. Dies erfolgt mit einer geeigneten Beschichtungstechnik wie beispielsweise Aufdampfen. Es ist jedoch auch möglich, den Interferometerkörper in einer geeigneten Gießform schrittweise auszubilden, indem eine dem Gesamt-Interferometerkörper entsprechende Gießform zunächst mit einem Gießverfahren mit härtendem Material entsprechend einem Teilprisma gefüllt, nach dem Härten der Strahlteiler aufgebracht und anschließend weiteres Material entsprechend dem zweiten Teilprisma aufgefüllt und ausgehärtet wird. In jedem Fall ist die Herstellung der Interferometeranordnung wesentlich vereinfacht. Die optischen Elemente sind außerordentlich stabil und mit einer festen Relativposition angeordnet. Im Unterschied zu einem herkömmlichen Sagnac-Interferometer können die Strahlteiler und Umlenkspiegel in der fertiggestellten Interferometeranordnung nicht mehr gegeneinander verkippen. Außerdem ist die Funktion der Interferometeranordnung unabhängig von irgendwelchen Luftströmungen, so daß eine Verwendung in beliebigen Umgebungen auch außerhalb des Labors möglich ist. Dies ergibt eine erhebliche Erweiterung des Einsatzbereiches von Interferometern für spektrale Meßtechniken.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden im folgenden auf die Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1-3 schematische Schnittansichten jeweils einer ersten, zweiten und dritten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Interferometeranordnung; und

Fig. 4 eine Illustration des Strahlengangs eines herkömmlichen Sagnac-Interferometers.

Bei der in Fig. 1 dargestellten Ausführungsform bildet der Interferometerkörper der Interferometeranordnung ein Prisma 10 mit ebenen Oberflächen, das eine in Bezug auf die Ebene des durch den Interferometerkörper verlaufenden Lichtweges fünfeckige Querschnittsgestalt aufweist. Der Interferometerkörper ist aus zwei vierseitigen Glasprismen gebildet, die sich entlang ihrer längsten Seitenflächen berühren. Die Seitenflächen bilden die Kontaktfläche und Symmetrieebene, wobei jeweils ein an die Kontaktfläche angrenzender Winkel 45° und ein der Kontaktfläche gegenüberliegender Winkel $112,5^\circ$ beträgt. Die Glasprismen sind so miteinander verbunden, daß die beiden 45° -Winkel zusammen einen rechten Winkel des Interferometerkörpers bilden, der von den Eintritts- bzw. Austrittsfenstern aufgespannt wird.

Der einfallende Lichtstrahl 11 tritt durch das Eintrittsfenster in das erste Teilprisma 10A und wird am Strahlteiler 13 in zwei Teilstrahlen gespalten. Der erste Teilstrahl führt weiter zum Umlenkspiegel 14 und wird von diesem über den

Umlenkspiegel 16 jeweils nach innen wieder zum Strahlteiler 13 gelenkt, wo eine Überlagerung mit dem zweiten Teilstrahl erfolgt, der vom Strahlteiler 13 aufeinanderfolgend über die Umlenkspiegel 16 und 14 und wieder zum Strahlteiler 13 gelenkt wird. Beide überlagerten Strahlen bilden den aus dem zweiten Teilprisma 10B austretenden Lichtstrahl 12.

Der Strahlteiler 13 ist eine teildurchlässige Beschichtung entlang der Kontaktfläche zwischen den Teilprismen. Die Beschichtung (in Fig. 1 aus Übersichtlichkeitsgründen relativ dick gezeichnet) wird etwa über die Hälfte der Fläche einer der entsprechenden Oberflächen der Teilprismen 10A, 10B aufgetragen, bevor diese zur Bildung des Interferometerkörpers zusammengeklebt werden. Die der Kontaktfläche gegenüberliegenden Seiten des Interferometerkörpers, die nicht die Eintritts- bzw. Austrittsfenster sind, sind mit reflektierenden Beschichtungen versehen. Um die Handhabung des Interferometerkörpers zu erleichtern, ist auf den reflektierenden Beschichtungen zusätzlich eine Schutzschicht aufgetragen. Die Strahlteiler- und Spiegelschichten sind vorzugsweise Aufdampfschichten.

Bei der Herstellung des Interferometerkörpers erfolgt nach Auftrag eines härtbaren Klebstoffs auf den der Kontaktfläche entsprechenden Seitenflächen eine Ausrichtung der Relativposition beider Teilprismen zueinander. Die Ausrichtung erfolgt unter Beobachtung eines Interferenzbildes z. B. eines einfallenden Weißlicht-Lichtstrahls. Da der Abstand von Interferenzstreifen von der Relativposition der Teilprismen abhängt, wenn diese geringfügig hin- und herbewegt werden, wird eine Position ausgewählt, in der die Interferenzstreifen die gewünschte Gestalt und Größe besitzen. Diese Position wird beibehalten, bis der Klebstoff ausgehärtet ist.

Der in Fig. 1 gestrichelt eingezeichnete Lichtweg repräsentiert einen mittleren Lichtstrahl, wobei die Pfeile im Interferometerkörper die Laufrichtungen der Teilstrahlen anzeigen. Die dargestellte Querschnittslänge der Kontaktfläche zwischen den Teilprismen beträgt beispielsweise 50 mm und die Gesamtdicke des Interferometerkörpers beträgt rd. 30 mm. Es ist jedoch möglich, je nach Anwendungsfall diese Größe zu variieren. So ist beispielsweise eine Miniaturisierung bis hin zu Dimensionen möglich, unter denen Beugungerscheinungen die interferometrische Messungen stören würden.

Ein Interferometer gemäß Fig. 1 ergab bei einem Test, daß bei Weißlicht-Beleuchtung rd. 12 farbige Interferenzstreifen sichtbar waren. Bei Einsatz eines Interferenzfilters wurden über 100 Interferenzstreifen beobachtet. Es wurde eine Streifentrennung von ungefähr $0,8^\circ$ ermittelt. Bei monochromatischer Beleuchtung zeigte sich, daß ein gleichförmiges Streifenbild abwechselnder heller und dunkler Bereiche über der gesamten optischen Apertur des Interferometerkörpers ausgebildet wurde.

Die Ausführungsform gemäß Fig. 2 basiert wie im Fall von Fig. 1 auf zwei Teilprismen, die entlang ihrer größten Seitenflächen miteinander verklebt sind. Die Kontaktfläche trägt in einem Teilbereich zur Bildung des Strahlteilers 23 eine teildurchlässige Beschichtung. Die Winkel der Prismen sind derart ausgewählt, daß der eintretende Lichtstrahl 21 über den ersten Umlenkspiegel 24 auf einen mittleren Umlenkspiegel 25 und von diesem auf den zweiten Umlenkspiegel 26 gerichtet wird. Der zweite Teilstrahl durchläuft den entgegengesetzten Lichtweg, so daß beide Teilstrahlen am Strahlteiler 23 in den austretenden Lichtstrahl 22 kombiniert werden.

Die Ausführungsform gemäß Fig. 3 zeigt einen sechseckigen Interferometerkörper, bei dem abweichend von den oben genannten Ausführungsformen die Teilstrahlen ge-

trennte Lichtwege durchlaufen. Der einfallende Lichtstrahl 31 wird mit dem Strahlteiler 33 getrennt. Der erste Teilstrahl wird über den Umlenkspiegel 34 zum Strahlteiler 33 zurückgelenkt und mit dem zweiten Teilstrahl, der über den Umlenkspiegel 36 umgelenkt wird, überlagert, um den austretenden Lichtstrahl 32 zu bilden. Aufgrund der hervorragenden Stabilität der erfindungsgemäßen Interferometeranordnungen ist es möglich, ohne Verlust an Leistungsfähigkeit zu einer Zweiweg-Anordnung überzugehen, wie es beispielhaft in Fig. 3 gezeigt ist.

Die in den Fig. 1 bis 3 dargestellten Ausführungsformen sind beispielhafte, schematische Prinzipdarstellungen. Es ist möglich, die geometrischen Verhältnisse je nach Anwendungsfall zu variieren. Dies betrifft sowohl die Winkel als auch die absoluten Größenverhältnisse. Ferner ist es möglich, beide Teilprismen aus verschiedenen oder zusammengesetzten Materialien herzustellen. So ist auch der Einsatz eines flüssigkeitsgefüllten Prismenkörpers denkbar, wobei je nach Anwendungsfall Flüssigkeiten verschiedener Brechzahlen verwendet werden.

Die Realisierung der Erfindung ist nicht auf die dargestellten fünf- oder sechseckigen Prismen beschränkt. Es ist vielmehr jeder Prismenaufbau möglich, der im Inneren einen ebenen Strahlteiler derart aufweist, daß ein den Strahlteiler durchsetzender Teilstrahl auf einen Umlenkspiegel auf einer Prismenoberfläche trifft und nach mindestens einer Reflexion zum Strahlteiler zurückgelangt und ein vom Strahlteiler reflektierter Teilstrahl ebenfalls auf einen Umlenkspiegel auf einer Prismenoberfläche trifft und nach mindestens einer Reflexion zum Strahlteiler gelangt, so daß beide Teilstrahlen zu einem gemeinsam austretenden Lichtstrahl überlagert werden.

In den Figuren sind die jeweiligen Lichtquellen und Detektorsysteme nicht dargestellt. Von den Lichtquellen geht entweder das zu untersuchende Licht oder ein Lichtstrahl aus, aus dem Untersuchungslicht für spektrale Messungen mit der Interferometeranordnung erzeugt werden soll. Die Interferometeranordnung kann ferner eine (nicht dargestellte) Halterung umfassen, die zum Verschwenken oder Verdrehen des Interferometerkörpers in Bezug auf den einfallenden Lichtstrahl eingerichtet ist. Eine derartige Halterung kann beispielsweise durch einen mit einem Stellmotor betätigbaren Drehtisch gebildet werden.

bei der der Strahlteiler (13, 23, 33) durch eine teildurchlässige Beschichtung auf einer der Seitenflächen gebildet wird.

5. Interferometeranordnung gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, bei der jedes Teilprisma mindestens eine ebene Oberfläche besitzt, die eine reflektierende Beschichtung zur Bildung der Umlenkspiegel aufweist.

6. Interferometeranordnung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, bei der der Interferometerkörper senkrecht zur Kontaktfläche einen fünfeckigen Querschnitt aufweist und die Lichtwege der Teilstrahlen identisch sind, jedoch von den Teilstrahlen entgegengesetzt durchlaufen werden.

7. Interferometeranordnung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, bei der der Interferometerkörper einen in Bezug auf die Kontaktfläche sechseckigen Querschnitt besitzt und die Lichtwege der Teilstrahlen in Bezug auf die Kontaktfläche symmetrisch angeordnet sind.

8. Interferometeranordnung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Interferometerkörper auf einer drehbaren Halterung gelagert ist.

9. Verfahren zur interferometrischen Messung mit einem Lichtstrahl, der in Teilstrahlen aufgespalten wird, die entlang vorbestimmter Lichtwege geführt und zu einem austretenden Lichtstrahl (12, 22, 32) überlagert werden, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilstrahlen durch einen für den eintretenden Lichtstrahl (11, 21, 31) durchlässigen Interferometerkörper geführt werden, in dem die Teilstrahlen mit einem Strahlteiler (13, 23, 33) geteilt und auf dessen Oberfläche die Teilstrahlen nach innen reflektiert werden.

10. Verfahren gemäß Anspruch 9, bei der der Interferometerkörper zur Erzeugung einer sich periodisch ändernden optischen Wegdifferenz zwischen den Teilstrahlen in Bezug auf den eintretenden Lichtstrahl gedreht wird.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

Patentansprüche

1. Interferometeranordnung mit mehreren Umlenkspiegeln und mindestens einem Strahlteiler, die so angeordnet sind, daß ein eintretender Lichtstrahl (11, 21, 31) in Teilstrahlen aufgespalten wird, die entlang vorbestimmter Lichtwege laufen und sich zu einem austretenden Lichtstrahl (12, 22, 32) überlagern, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtwege durch einen für den eintretenden Lichtstrahl (11, 21, 31) durchlässigen Interferometerkörper (10, 20, 30) führen, in dem sich der Strahlteiler (13, 23, 33) befindet und auf dessen Oberfläche die Umlenkspiegel (14, 16, 24, 26, 34, 36) angeordnet sind.
2. Interferometeranordnung gemäß Anspruch 1, bei der der Interferometerkörper aus zwei Teilprismen (10A, 10B, 20A, 20B, 30A, 30B) besteht, von denen sich jeweils zwei Seitenflächen zur Bildung einer ebenen Kontaktfläche berühren, auf der der Strahlteiler (13, 23, 33) angeordnet ist.
3. Interferometeranordnung gemäß Anspruch 2, bei der die Teilprismen symmetrisch in Bezug auf die Kontaktfläche angeordnet sind.
4. Interferometeranordnung gemäß Anspruch 2 oder 3,

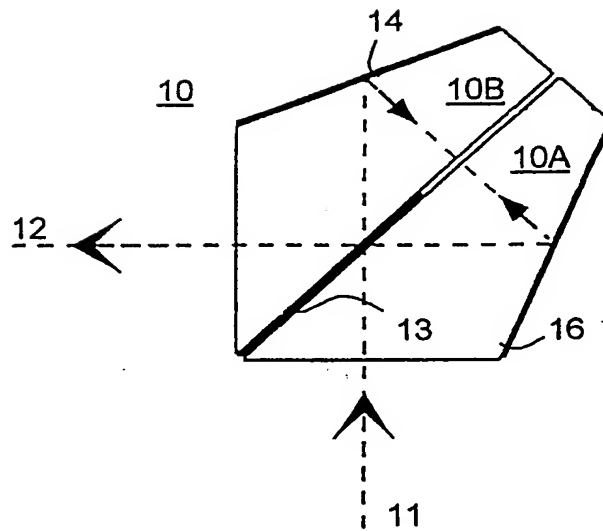


Fig. 1

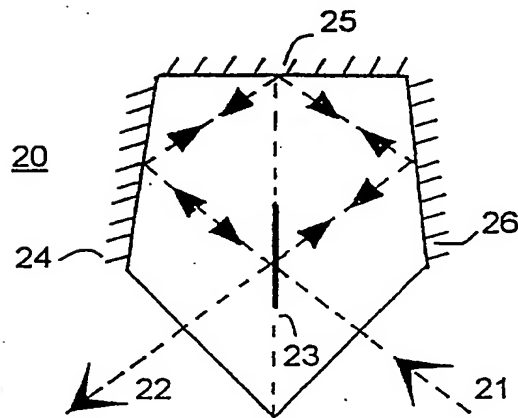


Fig. 2

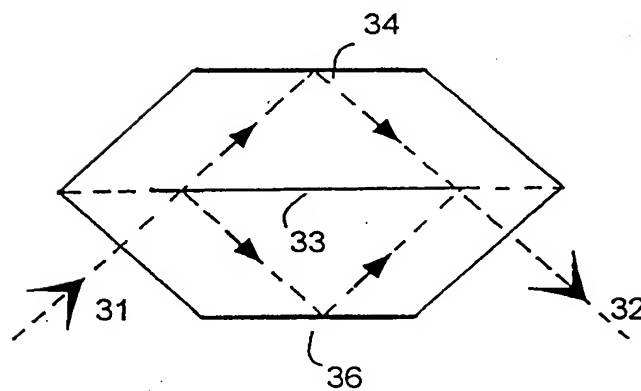


Fig. 3

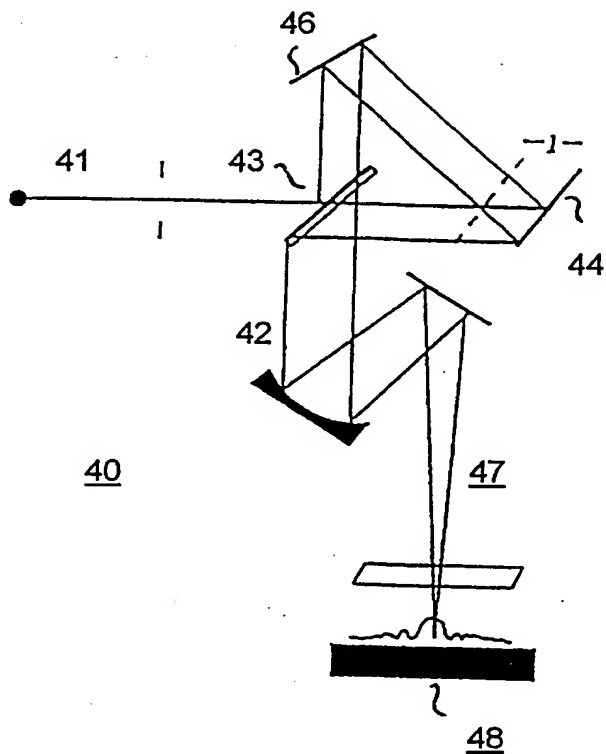


Fig. 4
(Stand der Technik)

